

# ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКОВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ СИСТЕМЫ Fe–Al, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Ю. С. БОРИСОВ<sup>1</sup>, А. Л. БОРИСОВА<sup>1</sup>, Е. А. АСТАХОВ<sup>1</sup>, Т. В. ЦИМБАЛИСТА<sup>1</sup>,  
А. Н. БУРЛАЧЕНКО<sup>1</sup>, М. А. ВАСИЛЬКОВСКАЯ<sup>2</sup>, А. И. КИЛЬДИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ИПМ им. И. Н. Францевича НАН Украины. 03680, г. Киев-142, ул. Кржижановского, 3. E-mail: deprconf@ipms.kiev.ua

Исследованы структура, состав и микротвердость детонационных покрытий, полученных при использовании порошков интерметаллидов  $Fe_3Al$ ,  $FeAl$  и  $Fe_2Al_5$ , изготовленных методом механохимического синтеза (МХС), и смесей порошков Fe и Al эквивалентных составов. Установлено влияние соотношения «кислород–горючий газ» в детонирующей смеси на процесс окисления напыляемого материала. В результате определения фазового состава покрытий, нанесенных с использованием различных порошков, показано, что в случае применения механических смесей слой состоит в основном из частиц исходной смеси Fe и Al. Структура покрытий из МХС Fe–Al-порошков содержит смесь продуктов нагрева и окисления этих порошков. Микротвердость покрытий изменяется от 4580 до 5710 МПа в зависимости от состава. Библиогр. 21, табл. 3, рис. 8.

*Ключевые слова:* детонационное напыление, алюминиды железа, порошки, механохимический синтез, состав детонирующей смеси, покрытия, фазовый состав, микротвердость

В связи с низкими прочностными свойствами алюминидов железа, особенно при комнатной температуре [1, 2], рациональным путем практического использования их высокой стойкости к коррозии и износу в агрессивных высокотемпературных газовых средах явилась разработка защитных покрытий, в том числе получаемых методами газотермического напыления (ГТН) из порошков на основе Fe–Al [3, 4]. Основная масса работ в этой области была проведена в США (Oak Ridge Nat. Lab., Idaho Nat. Lab) [5, 6] и Западной Европе — Франция (Технологический университет Бельфор-Монбельяр, Лилльский университет), Испания (Барселонский университет) с использованием плазменного и высокоскоростного газопламенного напыления [7–11].

Серия исследовательских работ по изучению структуры и свойств Fe–Al-покрытий, полученных методом детонационного напыления, была проведена в Варшавском военном университете [12, 13]. В качестве материала для нанесения покрытий при проведении указанных работ использовали порошки Fe–Al-сплава, полученные методом распыления расплава струей инертного газа Fe–28Al–2Cr и Fe–40Al–0,05Zr–0,01B, ат. %. Недостатком этого метода получения порошка Fe–Al являются трудности, связанные с операцией выплавки таких сплавов, исходные компоненты которых характеризуются большой разницей в

температурах плавления и высокой экзотермичностью процессов сплавообразования.

Более простым и менее затратным способом получения порошков интерметаллидов является использование процесса МХС, который реализуется в условиях высокоэнергетической обработки смесей порошков в шаровых планетарных или вибрационных мельницах [14, 15]. Это позволяет в значительной степени снять ограничения в составах разрабатываемых интерметаллидов и обеспечивает возможность химической и фазовой однородности синтезируемых порошков. Поскольку при МХС все реакции проходят в твердой фазе, то не возникает проблемы, связанной с проявлением флуктуаций по концентрации в жидкой фазе при переплаве. Практическое применение порошков интерметаллидов Fe–Al, полученных методом МХС, для нанесения газотермических покрытий, в том числе с наноразмерной структурой, представлено в работах [16–18].

Исследование формирования в условиях процесса МХС порошков интерметаллидов  $Fe_3Al$ ,  $FeAl$ ,  $Fe_2Al_5$  с изучением фазовых и структурных превращений было выполнено в работе [19].

Целью настоящей работы было исследование структуры и фазового состава детонационных покрытий из порошков интерметаллидов  $Fe_3Al$ ,  $FeAl$ ,  $Fe_2Al_5$ , полученных методом МХС, и из механических смесей порошков Fe+Al, рассчитан-

Таблица 1. Характеристика порошков на базе Fe–Al для ГТН

Состав	Метод получения	$H_{12}$ , МПа	Фазовый состав
86Fe + 14Al (мас. %)	Механическая смесь	1500 ± 230 (Fe), 330 ± 50 (Al)	Fe, Al
Fe <sub>3</sub> Al	МХС	4060 ± 1010	Fe <sub>3</sub> Al с $a = 0,5787$ нм
67Fe + 33Al (мас. %)	Механическая смесь	1500 ± 230 (Fe), 330 ± 50 (Al)	Fe, Al
FeAl	МХС	2530 ± 740	FeAl с $a = 0,2928$ нм
45Fe + 55Al (мас. %)	Механическая смесь	1500 ± 230 (Fe), 330 ± 50 (Al)	Fe, Al
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	МХС	2560 ± 800	Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> , примесь FeAl

ных на возможность получения в процессе их напыления интерметаллидов такого же состава.

С целью оценки влияния параметров детонационного напыления (ДН) на условия нагрева Fe–Al порошков и развитие процесса их окисления проводили сбор частиц порошка, прошедших обработку струей продуктов детонации, в водяную ванну с анализом их формы, размера и структуры, а также использовали «сплет–тест» для анализа формы и размера частиц, которые подверглись деформации при ударе об основу.

При этом было изучено влияние таких параметров ДН, как расход газа-разбавителя (воздуха) и соотношение расхода кислорода к горючему газу

( $\beta$ ), которые влияют на температуру и скорость струи продуктов детонации.

Процесс МХС проводили путем обработки смеси порошков Fe+Al в планетарной шаровой мельнице при скорости вращения барабанов 1500 об/мин, центральной оси — 1000 об/мин в течение 5 ч. Механические смеси готовили в лабораторном атриторе путем смешивания в течение 5 мин. Для нанесения покрытий использовали порошки конгломерированных продуктов МХС и механические смеси порошков Fe+Al с размером частиц 40...80 мкм. Характеристики порошков для ГТН представлены в табл. 1.

Напыление покрытий проводили на установке «ПЕРУН-С». В качестве основных параметров работы установки были использованы:

состав горючего газа ..... смесь пропан–бутана  
 ..... (60C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + 40C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, об. %)  
 газ–разбавитель ..... воздух  
 воздух транспортирующий ..... 0,4 м<sup>3</sup>/ч  
 частота выстрелов ..... 400/мин  
 загрузка порошка ..... 120 мг/выстрел  
 глубина загрузки порошка ..... 250 мм

В качестве базового режима ДН при изучении влияния расхода воздуха–разбавителя на дисперсность напыляемого порошка расход пропан–бутана составлял 0,45, кислорода 1,55 м<sup>3</sup>/ч. Расход воздуха изменяли в размерах 0,4; 0,6 и 0,9 м<sup>3</sup>/ч. Сбор частиц в водяную ванну проводили на расстоянии 50 мм от среза ствола установки. На рис. 1 представлены гистограммы распределения по размеру частиц — продуктов обработки в детонационной струе порошка Fe<sub>3</sub>Al (табл. 1). Из них следует, что в процессе подачи порошка в ствол установки и в результате воздействия струи продуктов детонации происходит разрушение части конгломерированных частиц. В связи с этим появляется фракция порошка с размером частиц менее 40 мкм, доля которой составляет 40...55 % в зависимости от расхода воздуха-разбавителя. Наибольшая степень измельчения — 55 % обнаружена в случае его расхода 0,6 м<sup>3</sup>/ч (рис. 1, б).

Снижение размера частиц с одной стороны улучшает условия их нагрева, а с другой — увеличивает относительный размер свободной поверхности, что может отразиться на степени окисления напыляемого материала.

Влияние показателя  $\beta$  на окисленность и микротвердость покрытий из порошка Fe<sub>3</sub>Al оце-

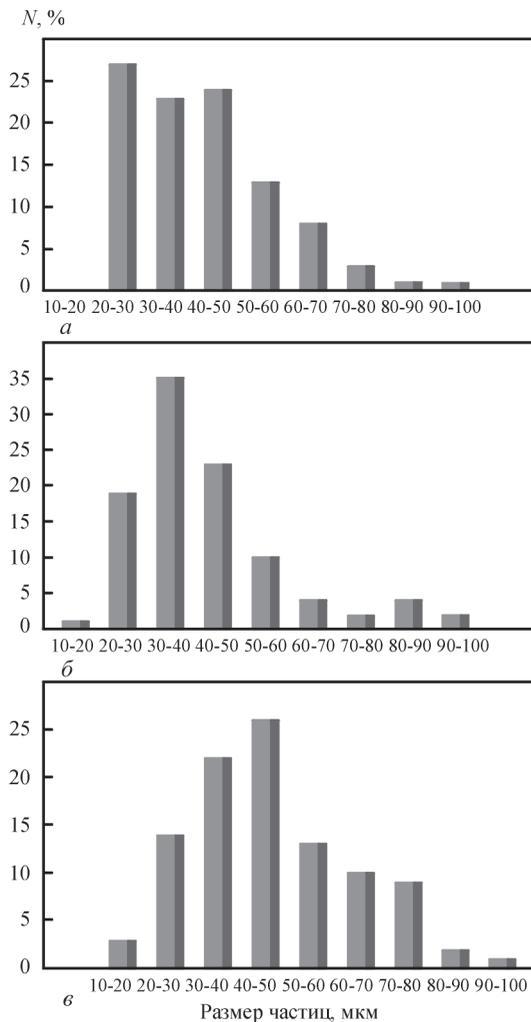


Рис. 1. Гистограмма распределения по размерам частиц порошка Fe<sub>3</sub>Al, распыленного в воду при расходе воздуха: а — 0,4; б — 0,6; в — 0,9 м<sup>3</sup>/ч (расход пропан–бутана 0,45, кислорода 1,55 м<sup>3</sup>/ч, дистанция напыления 110 мм)

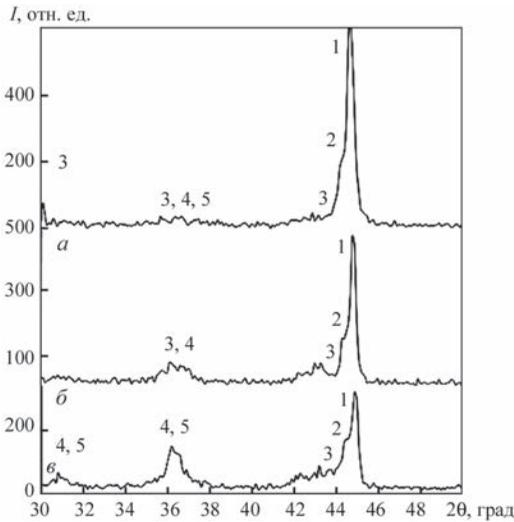


Рис. 2. Фрагменты рентгенограмм детонационных покрытий, полученных при разном соотношении кислорода и пропан-бутана в детонирующей смеси  $\beta$ : а — 2,1; б — 2,6; в — 3,1 (описание 1–5 см. в тексте)

нивали путем изменения расхода кислорода в пределах от 0,80 до 1,75 м<sup>3</sup>/ч при сохранении постоянными расходов пропан-бутана 0,5 м<sup>3</sup>/ч, воздуха-разбавителя 0,65 м<sup>3</sup>/ч и транспортирующего воздуха 0,4 м<sup>3</sup>/ч, что соответствует изменению  $\beta$  в пределах 1,6...3,5, а с учетом кислорода воздуха  $\beta'$  (соотношение общего кислорода (кислород + воздух) к горючему газу) — 2,04...3,90. Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

О содержании оксидов в покрытии судили по результатам металлографического и рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА). На рис. 2 в качестве примера приведены фрагменты рентгенограмм детонационных покрытий, полученных при разном соотношении кислорода и пропан-бутана в детонирующей смеси. На них участки под номерами 1 и 2 относятся к металлической составляющей покрытия (интерметаллиду Fe<sub>3</sub>Al и твердому раствору Al в Fe), а участки под номерами 3, 4, 5 — это отражения от оксидных фаз (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). По соотношению интенсивности рентгеновских отражений металлических и оксидных фаз оценивали их относительное содержание в покрытии (табл. 2).

Таблица 2. Влияние соотношения расхода содержащий кислорода и пропан-бутана в детонирующей смеси  $\beta$  на количество оксидов и микротвердость покрытий Fe–Al

Расход кислорода, м <sup>3</sup> /ч	Соотношение окислителя и горючего газа		H <sub>μ</sub> , МПа	Содержание оксидов по данным РСФА (об. %)
	$\beta$	$\beta'$		
0,8	1,6	2,04	3900 ± 520	<5
1,05	2,10	2,54	4230 ± 790	~5
1,3	2,6	3,04	4520 ± 610	~10
1,55	3,1	3,54	4620 ± 680	40
1,75	3,5	3,90	5767 ± 1280	~50

Примечание. Расход пропан-бутана 0,5; воздуха-разбавителя 0,65; транспортирующего воздуха 0,4 м<sup>3</sup>/ч; дистанция напыления 110 мм.

Резкое возрастание содержания оксидов при переходе расхода кислорода от 1,3 до 1,55 и величины  $\beta$  с 3,0 до 3,5 может быть объяснено изменением режима сгорания горючего газа от неполного (с образованием СО и Н<sub>2</sub>О) к полному (СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>О). Это приводит к повышению температуры и скорости струи продуктов детонации с перегревом частиц порошка [20, 21].

Это явление было обнаружено при исследовании зависимости формы сплетов (деформированных частиц напыляемого порошка) от условий напыления, в частности, соотношения расхода кислорода и горючего газа. На рис. 3 представлены сплеты, полученные при  $\beta = 2,2; 4,1$  и  $4,6$ . Во втором и третьем случаях сплеты сформировались из частиц перегретого расплава, имеющего низкую вязкость и содержащего оксидную фазу.

На основании результатов выполненных экспериментов по показателю степени окисления частиц напыляемого материала для получения образцов покрытий с целью исследования их структуры, фазового состава и микротвердости был выбран режим напыления детонационных покрытий из механических смесей и МХС порошков системы Fe–Al:

расход смеси 60 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>+40 % C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> ..... 0,5 м<sup>3</sup>/ч  
 расход кислорода ..... 1,3 м<sup>3</sup>/ч  
 расход воздуха-разбавителя ..... 0,6 м<sup>3</sup>/ч  
 дистанция напыления ..... 110 мм

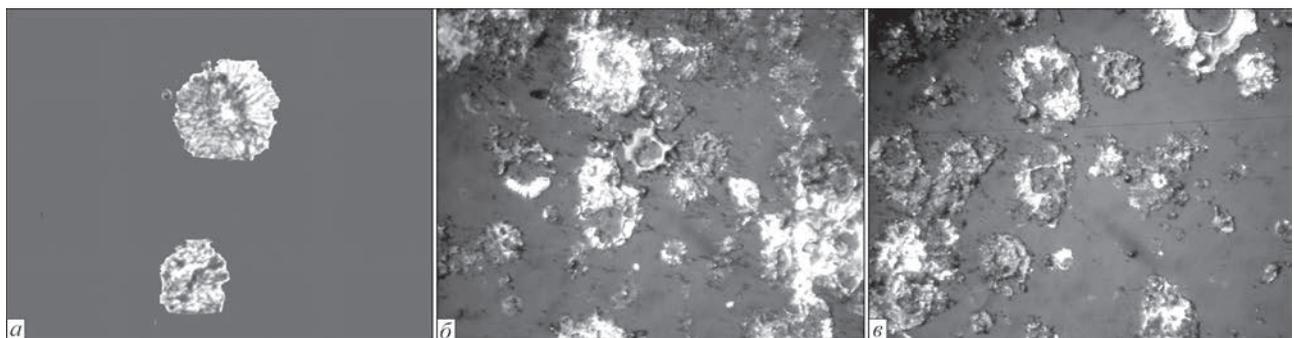


Рис. 3. Сплеты детонационных покрытий из порошка Fe<sub>3</sub>Al при различном соотношении расхода «кислород – пропан-бутан» (×500):  $\beta = 2,2$  (а), 4,1 (б), 4,6 (в)

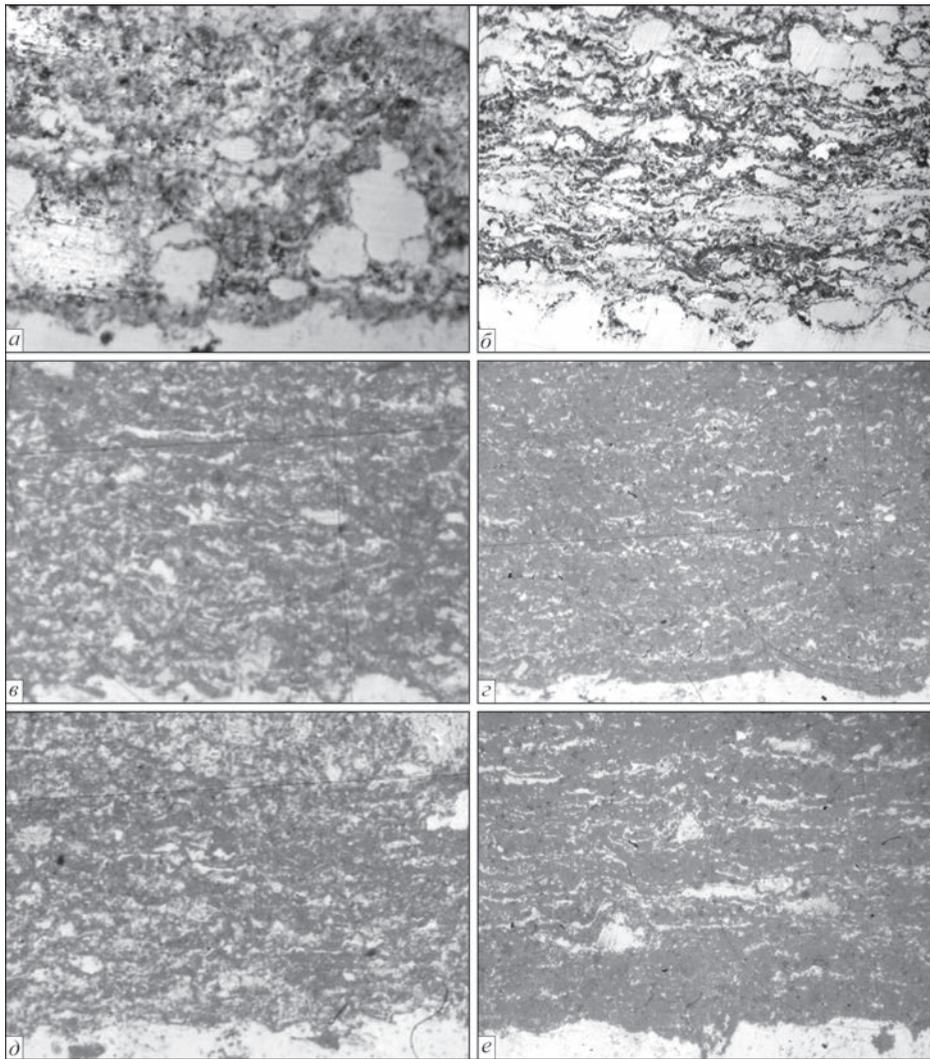


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 400$ ) детонационных покрытий: из механической смеси, мас. %: *a* — 86Fe + 14Al; *б* — 67Fe + 33Al; *д* — 45Fe + 55Al; из порошков интерметаллидов: *б* — Fe<sub>3</sub>Al; *з* — FeAl; *е* — Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>

В результате исследования структуры детонационных покрытий из порошков интерметаллидов системы Fe–Al трех составов, а также смесей порошков Fe+Al, рассчитанных на получение тех же составов при напылении, было установлено следующее.

В процессе напыления механических смесей формируется крупнозернистая, плотная структура, при этом дефекты и отслоения на границе с основой отсутствуют (рис. 4, *a*, *в*, *д*). Структура покрытий из МХС-порошков тонкодисперсная, ламелярная, с чередованием светлых (металлических) и темных (оксидных) ламелей (рис. 4, *б*, *з*, *е*).

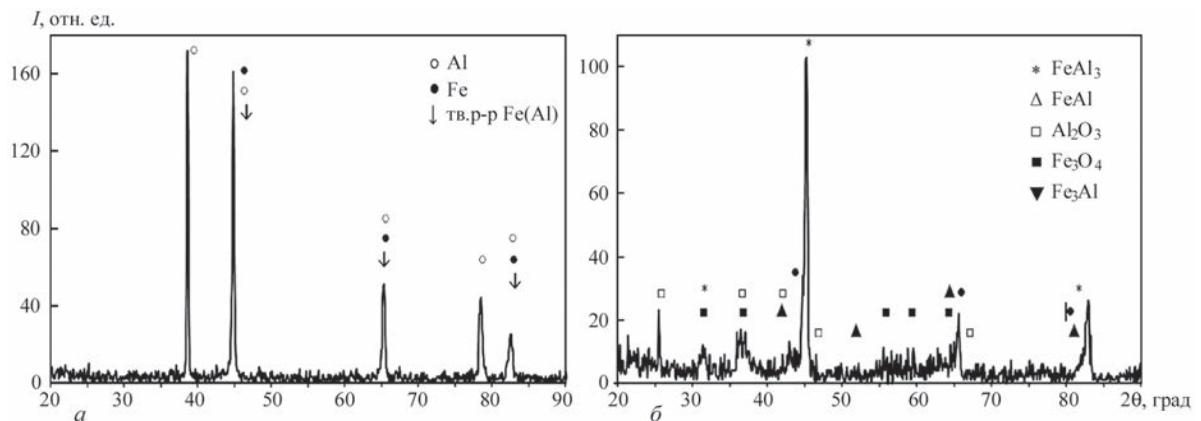


Рис. 5. Рентгенограммы детонационных покрытий: *a* — из механической смеси 86Fe + 14Al (мас. %); *б* — из МХС-порошка Fe<sub>3</sub>Al

Таблица 3. Характеристики детонационных покрытий из порошков Fe–Al, полученных механическим смешиванием и методом МХС

Порошок		Покрытие		
Состав	Метод получения	$H_{\mu}^*$ , МПа	РСФА	Характеристика микроструктуры
86Fe + 14Al (мас. %)	Механическая смесь	1490 ± 240 (650, 1250)	Тв. р-р Fe(Al), Al, Fe	Покрытие плотное, крупнозернистое, сформировано из слегка оплавленных недеформированных частиц исходных порошков и твердого раствора
Fe <sub>3</sub> Al	МХС	4580 ± 860 (4500)	Fe <sub>3</sub> Al, FeAl, FeAl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Структура lamellarная с чередующимися прослойками интерметаллидных и оксидных lamелей
67Fe + 33Al (мас. %)	Механическая смесь	3640 ± 1210 (2350, 5050)	Fe, Al, FeAl, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Покрытие плотное, структура lamellarная, с чередованием оксидных металлических lamелей, встречаются нерасплавленные металлические частицы
FeAl	МХС	5575 ± 1020 (4750)	Fe, Fe(Al), FeAl, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Структура покрытия тонколamellarная, без трещин и отслоений от основы
45Fe + 55Al (мас. %)	Механическая смесь	2000 ± 700 (1100, 2300)	Al, Fe, FeAl, Fe(Al), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Структура покрытия крупнозернистая с включениями частиц железа
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	МХС	5710 ± 1070 (6150)	Fe, FeAl, Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Покрытие плотное с тонколamellarной структурой, без трещин и отслоений от основы

\* Указаны средние и в скобках наиболее вероятные значения микротвердости покрытий.

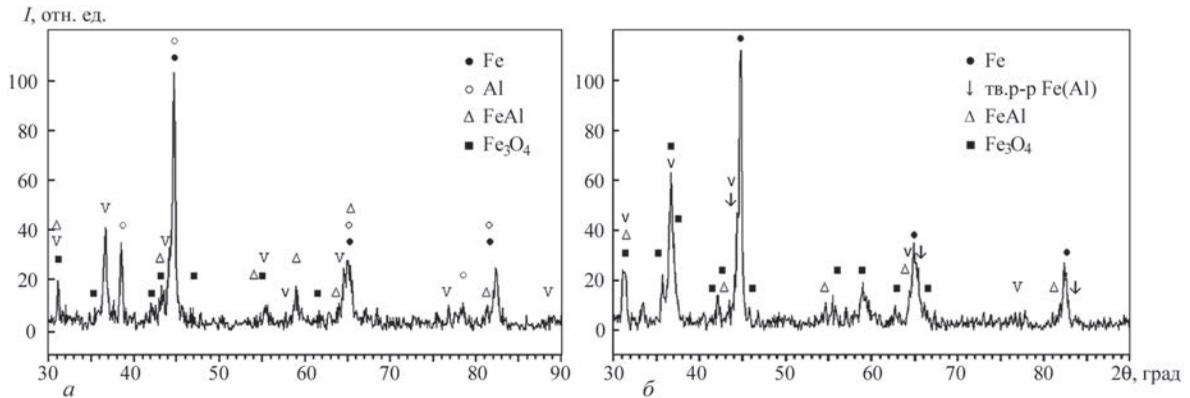


Рис. 6. Рентгенограммы детонационных покрытий: а — из механической смеси 67Fe + 33Al (мас. %); б — из МХС-порошка FeAl

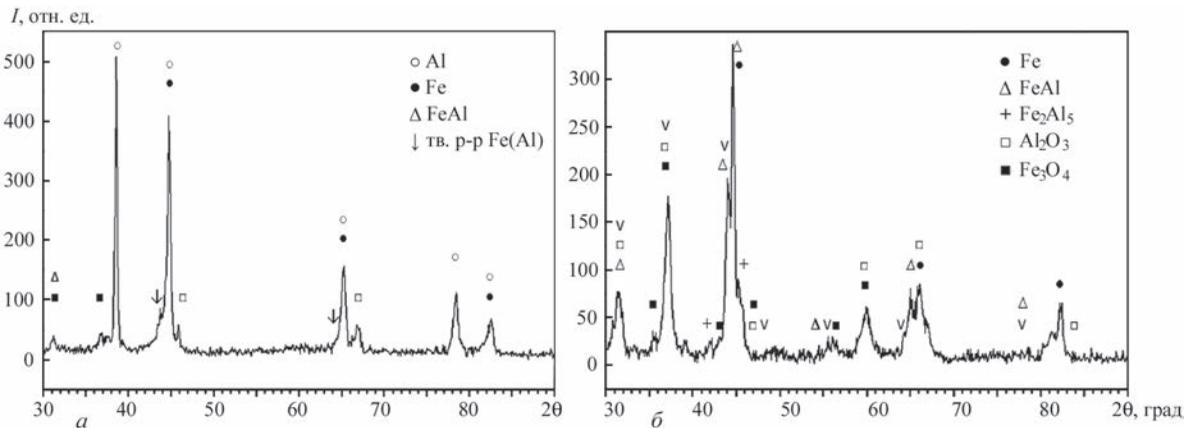


Рис. 7. Рентгенограммы детонационных покрытий: а — из механической смеси 45Fe + 55Al (мас. %); б — из МХС-порошка Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>

Согласно данным РСФА было установлено, что в условиях детонационного напыления механических смесей порошков Fe и Al степень межфазного взаимодействия компонентов не обеспечивает реализацию процесса синтеза соответствующих расчетному интерметаллидных фаз, в покрытиях сохраняются исходные компоненты Fe и Al. Интерметаллидные фазы обнаружены в

небольшом количестве наряду с оксидами алюминия и железа (рис. 5, а, 6, а, 7, а, табл. 3).

Фазовый состав покрытий из МХС-порошков также не вполне соответствует составу исходных порошков. Интерметаллидные фазы обнаружены в покрытиях из порошков Fe<sub>3</sub>Al (Fe<sub>3</sub>Al, FeAl, FeAl<sub>3</sub>), FeAl (FeAl), Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> (FeAl, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>). В случае порошков FeAl и Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, в основном это твер-

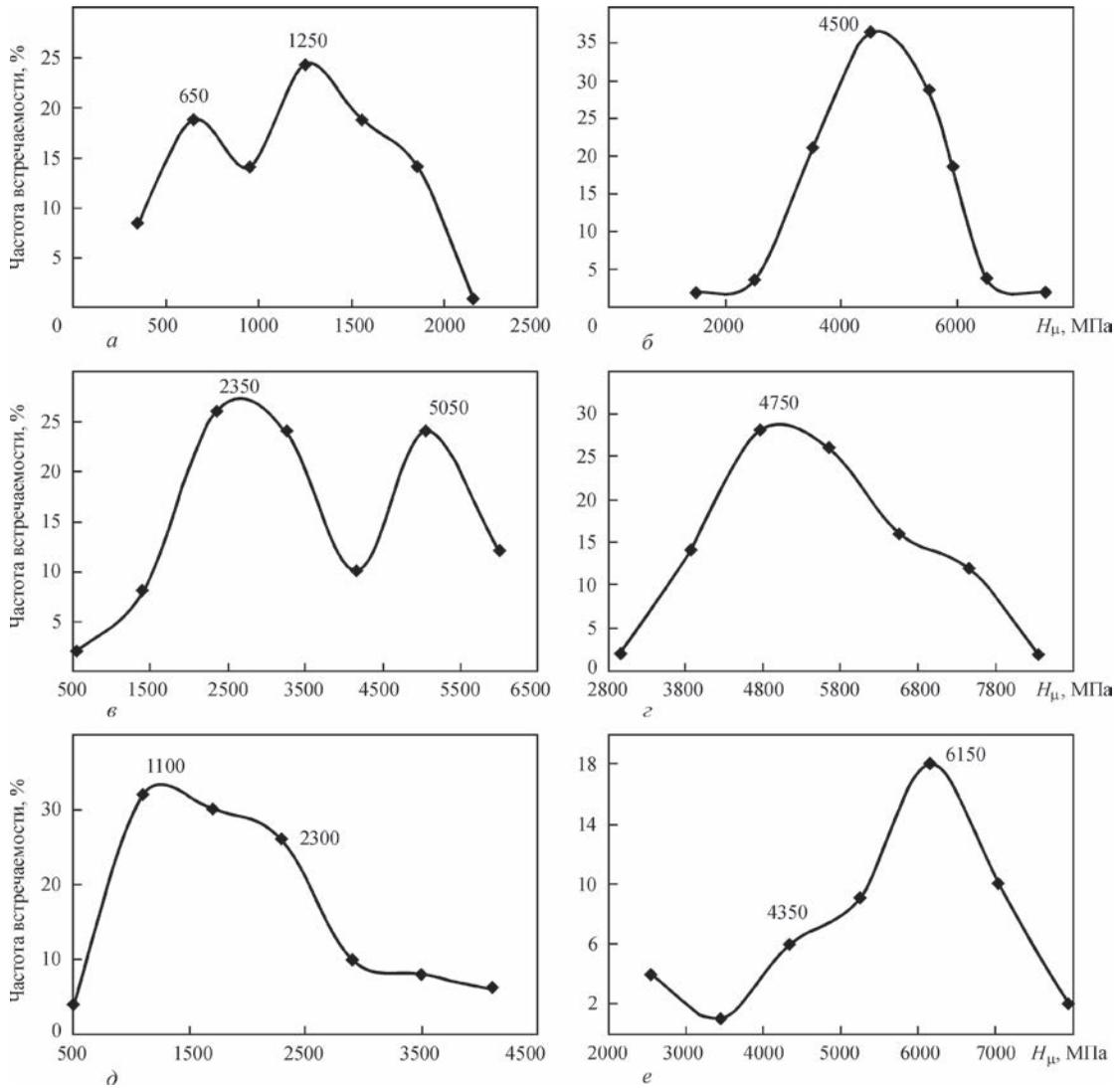


Рис. 8. Вариационные кривые микротвердости детонационных покрытий, полученных из механических смесей Fe+Al (а, в, д) и МХС (б, г, е) порошков: а, б – Fe<sub>3</sub>Al; в, г – FeAl; д, е – Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>

дые растворы алюминия в железе. В результате взаимодействия с окружающей средой образовались оксиды железа, алюминия и сложные оксиды (рис. 5, б, 6, б, 7, б, табл. 3).

По результатам измерения микротвердости детонационных покрытий из механических смесей Fe+Al и МХС порошков Fe<sub>3</sub>Al, FeAl, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> были построены вариационные кривые микротвердости (рис. 8). Характер вариационных кривых свидетельствует об однородном распределении микротвердости для покрытий из порошка с исходным составом Fe<sub>3</sub>Al (рис. 8, б). при этом как среднее (4580 ± 860), так и наиболее вероятное (4500 МПа) значение микротвердости превосходит результат для исходного порошка (4060 ± 1010 МПа, табл. 1). Еще более существенное повышение микротвердости покрытий по сравнению с исходным порошком наблюдается для двух других составов (интерметаллидов FeAl и Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>). Это очевидно связано с наличием большого количества оксидов в напыленных покрытиях.

**Выводы**

1. Детонационные Fe–Al-покрытия сформированы с использованием порошков интерметаллидов Fe<sub>3</sub>Al, FeAl и Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, полученных методом МХС, и смесей порошков Fe и Al с составом, соответствующим данным интерметаллидам.
2. Установлено, что в процессе детонационного напыления происходит изменение исходного гранулометрического состава Fe–Al порошка с конгломератной структурой 40...80 мкм, приводящее к появлению 40...55 мас. % фракций размером 10...40 мкм.
3. Анализ развития процесса окисления напыляемого материала Fe–Al-покрытия, проведенный с использованием РСФА и сплет-теста, показал зависимость содержания оксидной фазы от соотношения количества кислорода и пропан–бутана в детонирующей смеси β. Резкое повышение содержания оксидов с приблизительно 5 до 30...40 мас. % происходит при увеличении β свыше 3,5.

4. Установлено, что в условиях детонационного напыления при использовании механических смесей порошков Fe+Al не удается обеспечить активное межфазное взаимодействие между компонентами и сформировать интерметаллидные фазы. Структура таких покрытий в основном состоит из отдельных частиц компонентов. В случае применения МХС Fe–Al порошков формируются плотные детонационные покрытия с керметной структурой, состоящие из смеси металлических фаз (интерметаллиды, твердые растворы, металлы) и продуктов окисления.

5. Структура и фазовый состав детонационных покрытий из МХС-порошков интерметаллидов Fe–Al свидетельствует о значительном развитии процесса их окисления, что приводит к частичной потере интерметаллидной структуры с образованием фаз Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, и FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Микротвердость покрытий зависит от состава исходного порошка и возрастает при переходе от Fe<sub>3</sub>Al к Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, с 4580 до 5710 МПа.

13. Microstructure Characterization of D-gun Sprayed Fe–Al Intermetallic Coatings / C. Senderowski et al. // *Intermetallics*. – 2010. – Vol. 18, № 7. – P. 1405–1409.
14. Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling // *Progress in Mater. Sci.* – 2001. – № 46. – P. 1–184.
15. Аруначалам В. С. Механическое легирование: сб. Актуальные проблемы порошковой металлургии. – М.: Металлургия, 1990. – С. 175–202.
16. Ji Gang, Grosdidier T., Morniroli J-P. Microstructure of a High-Velocity Oxy-Fuel Thermal-Sprayed Nanostructured Coating Obtained from Milled Powder // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2007. – Vol. 38A. – P. 2455–2463.
17. Characterization and comparison between ball milled and plasma processed iron-aluminium thermal spray coatings / S. Kumar et al. // *Surface & Coatings Technology*. – 2006. – 201. – P. 1267–1275.
18. Grosdidier T., Tidu A., Liao H. L. Nanocrystalline Fe–40Al Coating Processed by Thermal Spraying of Milled Powder // *Scripta Materialia*. – 2001. – 44. – P. 387–393.
19. Фазовые и структурные превращения при формировании порошков интерметаллидов системы Fe–Al методом МХС / А. Л. Борисова и др. // *Порошковая металлургия*. – 2015. – №7, 8. – С. 135–143.
20. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. – 227 с.
21. Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А. Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.

### Список литературы

1. Deevi S. C., Sikka V. K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications // *Intermetallics*. – 1996. – № 4. – P. 357–375.
2. Stoloff N. S. Iron aluminides: present status and future prospects // *Materials Science and Engineering. A*. – 1998. – Vol. 258, Iss. 1-2. – P. 1–14.
3. Cinca N., Guilemany J. M. Thermal spraying of transition metal aluminides: An overview // *Intermetallics*. – 2012. – Vol. 24. – P. 60–72.
4. Cinca N., Guilemany J. M. An overview of intermetallics research and application: Status of thermal spray coatings // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2013. – V. 2, № 1. – P. 1–11.
5. Totemeier T. C., Swank W. D. Microstructure and Stresses in HVOF Sprayed Iron Aluminide Coatings // *Journal of Thermal Spray Technolog.* – 2002. – Vol. 11(3). – P. 2–9.
6. Wright R. N., Totemeier T. C. Microstructure and Properties of Iron Aluminide Coatings // *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2002 (manuscript)*.
7. Surface Engineering by Thermal Spraying Nanocrystalline Coatings: the case of iron aluminide / Ji Gang et al. // *Materiaux*. – 2002. – P. 1–3.
8. Gang Ji, Elkedim O., Grosdidier T. Deposition and Corrosion resistance of HVOF Sprayed Nanocrystalline Iron Aluminide Coatings // *Surface & Coatings Technology*. – 2005. – 190. – P. 406–416.
9. Studies of Fe–40Al coatings obtained by high velocity oxy-fuel / J. M. Guilemany et al. // *Ibid.* – 2006. – 201. – P. 2072–2079.
10. Guilemany J. M., Cinca N. High-temperature oxidation of Fe–40Al coatings obtained by HVOF thermal spray // *Intermetallics*. – 2007. – Vol. 15. – P. 1384–1394.
11. FeAl and NbAl<sub>3</sub> Intermetallic-HVOF Coatings: Structure and Properties / J. M. Guilemany et al. // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2009. – Vol. 18, Iss. 4. – P. 536–545.
12. Senderowski C., Bojar Z. Cas detonation spray forming of Fe–Al coatings in the presence of interlayer // *Surface & Coatings Technology*. – 2008. – 202. – P. 3538–3548.

Ю. С. Борисов<sup>1</sup>, А. Л. Борисова<sup>1</sup>, Е. А. Астахов<sup>1</sup>,  
Т. В. Цимбалиста<sup>1</sup>, О. М. Бурлаченко<sup>1</sup>,  
М. А. Васильківська<sup>2</sup>, А. І. Кільдій<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України.  
03680, м. Київ-142, вул. Кржижанівського, 3.  
E-mail: deprconf@ipms.kiev.ua

### ДЕТОНАЦІЙНІ ПОКРИТТЯ З ПОРОШКІВ ІНТЕРМЕТАЛІДІВ СИСТЕМИ Fe–Al, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ МЕХАНОХІМІЧНОГО СИНТЕЗУ

Досліджено структуру, склад та мікротвердість детонаційних покриттів, отриманих при використанні порошків інтерметалідів Fe<sub>3</sub>Al, FeAl і Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, виготовлених методом механохімічного синтезу (МХС), і сумішей порошків Fe і Al еквівалентних складів. Встановлено вплив співвідношення «кисень–горючий газ» в детонуючій суміші на процес окислення напилюваного матеріалу. В результаті визначення фазового складу покриттів, нанесених з використанням різних порошків, показано, що в разі застосування механічних сумішей шар складається в основному з частинок первинної суміші Fe і Al. Структура покриттів з МХС Fe–Al-порошків містить суміш продуктів нагріву і окислення їх матеріалу. Мікротвердість покриттів змінюється від 4580 до 5710 МПа в залежності від складу. Бібліогр. 21, табл. 3, рис. 8.

*Ключові слова:* детонаційне напилення, алюмініди заліза, порошки, механохімічний синтез, склад детонуючої суміші, покриття, фазовий склад, мікротвердість

Поступила в редакцію 31.03.2017